 論文

不確実性を考慮した森林管理に関する計画論的研究

黒川 泰亨^{1,*}

黒川泰亨：不確実性を考慮した森林管理に関する計画論的研究，森林計画誌 40：125～137，2006 森林経営においては，生産活動が超長期におよぶため生産に対する自然力の支配が他の生産活動に比較して大きく，経営自体がリスクの大きい環境下に置かれている。本稿では，リスクを考慮した森林計画問題のシステム化について計画論の立場から考察を加えた。具体的には，ポートフォリオ理論に依拠し，確率分布の収益性を期待値，リスクを分散で捉えるE-V基準に基づき，2次計画法を適用して多期間における林分選択の最適化問題について計画論的視点から検討を行った。この結果は，森林管理に対して有効な情報を提供すると思われる。

Yasuaki KUROKAWA: A Study on the Planning System of Forest Management under Uncertainty. *Jpn. J. For. Plann.* 40: 125~137, 2006 The key task for forest planner is to describe the expected production potentials of forest, and to allocate the forest area to produce the timbers and services that are wanted. One of the most important decision that a forest owner must make is to determine whether a forest stand should be cut or reserved or when it should be cut in accordance with the estimation of its financial maturity period with the maximization of the total net present value of the whole forestry stand. Stochastic programming is the study of practical procedures for decision making under presence of uncertainties and risks. This paper aims to describe an approach for timber harvest scheduling and optimization of forest stands retention period by the considering of uncertainties and risks. The model is based on the expectation variance (E-V) criteria. The method is based on the combined use of a network planning system and a quadratic programming that generates treatments schedules for forest stands and selects optimal schedule combination. The forest planning system consists of two principal parts: optimization and simulation. In the simulation the future development of stands is predicted and a large number of possible treatments schedules are generated for each stands. The simulation also produces information on the results attained if the treatment schedule is applied. This model can therefore furnish more effective information on the long term forest management decision making of forest owners.

I はじめに

システムとは相互に関係を持つ構成要素から成り立つ全体のことであると言うのが一般的な定義である。システム化とはこの複雑な相互関係を持つ諸要素から成り立つ全体が組織管理の決められた目標に向かって効率よく円滑に運営される仕組みを確立することであると言える(杉田, 1979)。本論文は，不確実性下での多期間における林分選択問題のシステム化について計

画論の立場から考察を加える。森林は時間を含んだ複雑な系を持つため，森林を対象としたモデルには多数の変数を準備することが必要となる。変数と変数とを結び付ける関係式は1つのシステムを構成するが，森林は多様かつ長期動態的な系を持つため，森林に関するシステムは複雑なものとなる。

本稿では，森林管理に特有のリスクを考慮した計画問題のシステム化を取り上げるが，具体的にはポートフォリオ理論に依拠して多期間にわたる林分選択の最

* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: kurokawa@muses.tottori-u.ac.jp

1 鳥取大学農学部 Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori 680-0945.

適化に関して計画論的視点から検討を行うものである。木材生産を目的としている森林所有者は、一方では高い純収益を期待し他方で危険を回避するという行動を取るのが一般的である。平均一分散という2つの積率を用いて森林経営における林分選択の最適化の方法を考え、不確実性下の合理的行動について検討する。本稿では、伝統的なポートフォリオ理論に依拠し、単純に収益が大きく分散が小さいものが望ましいと考えた。

II 森林経営の指導原則

森林経営においては、生産活動が超長期に及ぶため、生産に対する自然力の支配が他の生産活動と比較して大きく、経営自体がリスクの大きい環境下に置かれている。よって従来から森林経営の指導原則として収益性原則と保続原則が特に重視されてきた。収益性原則はあらゆる経営に共通する原則でもあるが、最大の純収益を獲得するよう森林経営を行うことを要請するものである。一方、保続原則は森林から得られる便益を連年均等的かつ永久に保持するよう森林経営を行うことを要請するものである。以上2つの指導原則に依拠すれば、森林経営は森林から得られる多様な便益を可能な限り大きくし、かつ森林資源を永久に健全な状態に保持するよう森林をコントロールする行為であると言えよう。

各種の森林施業は森林を人為的にコントロールする手段であるが、植栽は育林投資の開始行為として、伐採は育林投資の回収行為として特に重要な意義を持つ。森林経営は林地に対する林木の植栽で開始され、伐採・収穫を以って1サイクルが完了するが、森林管理上の最も重要な意思決定は、どの林分をいつ伐採し、どの林分を次期に残すかを明確にして各林分の最適な保有期間を決定することであると言える (Davis and Johnson, 1987)。

林分の最適保有期間の決定に関する問題は、伝統的には森林較利学の中で取り扱われてきた。森林較利学における理論は計算の厳密さの点では優れたものであるが、森林較利学は与件の動的変化を無視した静態経済を前提としたものであること、経営実行上の諸々の制約を無視した抽象次元の計算であって経営モデルが欠如していること、単一投資を対象としており多数の投資対象が重畳した状態の取り扱いが困難であること等の点で実践力が乏しいと言えよう (栗村, 1970)。

III 森林に関する状態変数と系列的多段決定

森林管理では林分の伐採や植栽に関する決定は系列的多段決定過程と考えられる。この多段決定過程を構

成する各段階は、1) 入力状態ベクトル, 2) 出力状態ベクトル, 3) 決定ベクトル, 4) 状態変換, 5) 段階利得の5つの要素によって記述することができる。森林管理に関する多段決定過程では前段階の出力状態ベクトルがそのまま次段階の入力状態ベクトルを形成することになるから、いわゆる系列的である。この系列的多段決定過程は以下のように考えることができる (林野庁, 1974)。

任意の時期 t における森林の状態は、状態変数ベクトル S_t として式 (1) のように表現できる。

$$S_t = \begin{pmatrix} D_{1t} \\ D_{2t} \\ D_{3t} \\ \vdots \\ D_{nt} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、ベクトル成分 $D_{1t}, D_{2t}, \dots, D_{nt}$ は、林齢、面積、本数、樹高、材積などを意味し、森林の状態を具体的に表わすものである。森林の状態に関するベクトル成分は、森林に対して何らかの人為的コントロールが加わらない自然放置の場合でも時間の経過に伴って変化していく。森林は t 期から $t+1$ 期にかけて林齢が1期分進み、それに伴って樹高や材積も成長する。通常は t 期から $t+1$ 期へ森林が推移する過程に森林施業として森林に対して何らかの人為的コントロールが加わる。

IV 系列的多段決定と森林施業

森林に対する t 期の森林施業を M_t として式 (2) のように表現できる。

$$M_t = \begin{pmatrix} Q_{1t} & \cdots & \cdots & \cdots & : \\ : & Q_{2t} & \cdots & \cdots & : \\ : & \cdots & Q_{3t} & \cdots & : \\ : & \cdots & \cdots & \cdots & : \\ : & \cdots & \cdots & \cdots & Q_{nt} \end{pmatrix} \quad (2)$$

行列成分 $Q_{1t}, Q_{2t}, \dots, Q_{nt}$ は、植栽、下刈、除間伐、主伐などを表わし森林施業の内容を具体的に示すものである。 t 期から $t+1$ 期への森林の推移は、 M_t を用いて式 (3) のように記述できる。

$$\begin{pmatrix} D_{1,t+1} \\ D_{2,t+1} \\ D_{3,t+1} \\ \vdots \\ D_{n,t+1} \end{pmatrix} = M_t * \begin{pmatrix} D_{1,t} \\ D_{2,t} \\ D_{3,t} \\ \vdots \\ D_{n,t} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式(3)から明らかとなり、次期の森林状態は今期の森林状態と今期の森林施業に依存して決定されることになる。本研究では、初期状態として S_0 の状態であった森林は、 m 分期にわたる計画期間に、

$$\begin{aligned} S_1 &= M_0 * S_0 \\ S_2 &= M_1 * S_1 \\ S_3 &= M_2 * S_2 \\ &\dots\dots \\ S_m &= M_{m-1} * S_{m-1} \end{aligned} \quad (4)$$

と推移して終端状態としての S_m へ逐次変換されていくと仮定した。式(4)に示す森林の変換過程における森林施業 M_t に伴って発生する段階費用を式(5)、間伐や主伐による段階収益を式(6)のように考えると、

$$C_t = \zeta_t(M_t) \quad (5)$$

$$R_t = \xi_t(M_t) \quad (6)$$

初期状態から終端状態へ m 分期にわたり森林が変換されていく過程で段階利得として式(7)に示す費用系列と式(8)に示す収益系列が得られこれが利得系列となる。

$$C_1, C_2, \dots, C_m \quad (7)$$

$$R_1, R_2, \dots, R_m \quad (8)$$

以上のように構成される系列的多段決定過程において、式(7)と式(8)の対応から m 分期にわたる計画期間において式(9)に示す最大の割引純収益が獲得できる M^* を求めたとき、森林経営に関する最適計画が策定されたことになる。

$$M^* = (M_1, M_2, M_3, \dots, M_m) \quad (9)$$

森林の多様な状態を具体的に表現するには状態変数ベクトルや森林施業ベクトルに関する成分を多くする必要があるが、成分を多くすればそれだけ森林施業と森林状態の関連付けが複雑になる。そこで第1次接近として、樹種を特定した一斉人工林の場合を対象にし、林分毎の地位や施業法等が同じであるとする、森林状態は林齢別面積で表現できる。その他の森林状態に関する成分は、従属的に決定されるとしても差し支えない。

ここで、状態変数ベクトルを式(10)のように記述し、

$$S_t = \begin{pmatrix} A_{1,t} \\ A_{2,t} \\ A_{3,t} \\ \vdots \\ A_{n,t} \end{pmatrix} \quad (10)$$

ベクトル成分 A_{nt} を t 期における林齢 n 年の林分面積とすると、上記モデルは極めて単純化され、最終的には各計画分期における個別林分の林齢別伐採面積を

求める問題に帰着できる。伐採跡地の植栽を伐採直後に実行するものとする、求めるべき最適決定ベクトル M^* は計画対象林分の各計画分期における林齢別伐採面積を示すことになる。このように単純化した多段決定過程をネットワークにおける最適フローの決定問題として展開すれば、線形計画法による最適化問題に帰着できる(黒川, 1988)。

V 多段決定とネットワーク構造

上述の式(10)に示した森林に関する状態変数ベクトルにおけるベクトル成分 A_{nt} を t 期における n 林級の林分面積とすると、森林経営に関する多段決定過程は図-1のようなノードとアークを持つネットワーク図で表現できる。このネットワークは、計画当初11-15年生、26-30年生、41-45年生および51-55年生の4つの林分に関して、計画期間6分期30年における林分の動きを示したものである。例えば計画当初において51-55年生の伐採可能林齢に達した林分は、計画分期1へ進む際には、伐採されず5年間成長してU2のアークを辿る林分と、伐採されその直後に新植されるU1のアークを辿る林分の何れかのルートを進むことになる。当然ながら伐採されずそのまま成長する林分面積と伐採され直後に新植される林分面積の合計は元の林分面積に等しい。さらにU2のアークを進んだ林分は第2分期においてU3またはU4の何れかのアークを進む。以下同様に伐採可能林齢に達した林分は必ず分岐する2本のアークを持つが、伐採可能林齢に達しない林分は成長するのみであるので1本のアークしか持たず分岐するアークを持たない。また老齢過熟林分の形成を回避

図-1 計画のネットワーク図

するため所定の林齢に到達した林分を必ず伐採する場合には伐採に相当するアークしか持たないことになる。

図-1のネットワーク図によれば、計画当初に存在した4つの林分は、計画期末には6つの新生林分と3つの既存林分が残存する潜在的可能性を持っている。本稿では伐採直後に必ず新植することを前提としているが、伐跡地について、1)裸地状態での放置を許容する場合、2)1分期以上経過後における新植を許容する場合、3)林種転換や樹種転換を行う場合、4)他作目への転用を考える場合、5)経営規模を拡大する場合にはそれに相当するアークとノードを準備する必要がある。アークとノードの数は計画分期の進行に応じて加速的に増加する。計画対象林分数が多ほど複雑なネットワークを構成するが、ネットワーク上の各アークに対応する最適フローを決定すれば、式(9)に示した森林経営における林分保有の最適計画を策定したことになる。

VI 保続原則と終端状態

森林管理においては保続原則が重要な意義を持つ。m分期後の計画期末に形成される林分状態、すなわち式(11)に示す終端状態としてのベクトルの内容ならびに各分期における伐採面積や伐採材積等が保続原則を具体化するうえで重要な要素となる。

$$\mathbf{S}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{1,m} \\ \mathbf{A}_{2,m} \\ \mathbf{A}_{3,m} \\ \vdots \\ \mathbf{A}_{n,m} \end{bmatrix} \quad (11)$$

計画期間中に強度の伐採を行えばそれに伴って多額の収益が得られるが、計画期末に若齢林分が多く形成され森林経営の保続が確保できなくなるため、計画期末に形成される林分についても林齢と面積を指定し、これを制約条件として設定することが資源保続はもとより森林経営維持の観点から必要となる。

森林経営の維持という観点からは、計画期末に成立する林分の林齢と面積は、系列的多段決定過程の終端条件として次ステージの計画を策定する場合の与件を形成するが、ゴーイング・コンサーンとしての森林経営を考える場合には特に重要な意義を持つ。さらに森林資源の保全という観点からは伐採面積の上限制約が大きい意義を持つ。景観維持や公益的機能発揮の観点から、伐採の規模を制約するために伐採・新植に相当するフローに一定の上限制約を設定することも必要となる。また分期毎の収穫材積に対して厳密に水準を指定するいわゆる水平保続(even-flow)を確保するための

制約や、当該分期の伐採材積が前分期の伐採材積の水準を下回らない等の非低減型水平保続(nondeclining even-flow)を確保するための下限制約を設定することも保続原則を確保する上で重要となる。この伐採ならびに新植に相当するフローに関する制約が収穫規整と大きく係わることになる(Boungiorno and Gilles, 2003)。

VII リスク管理とE V基準

森林経営においては、生産に対する自然力の支配が他の生産活動と比較して大きく、経営自体がリスクの大きい環境下に置かれていることは既に述べたとおりあるが、ここでポートフォリオ理論に依拠してリスク処理の問題を考える。ポートフォリオ理論は、不安定な収益に対する危険の程度を分散あるいは標準偏差の統計的手法によって数量化し、確かに実現するであろう期待値とその分散に基づく効率的な投資の選択過程を取り扱うものである。従来からポートフォリオ分析は、主として金融資産を対象としてきており、生産物等の実物資産を対象とすることは殆どなかった。この理由として、実物資産はキャッシュ・フローの測定に複雑な問題が存在すること、十分な分割の可能性や他資産への代替の可能性が乏しいこと等がその主な理由となっていると言えよう。

収益の確率分布関数の特性が期待値とリスクの2つのパラメータを用いて表わすことができる場合には、これらの指標に基づいた2母数接近法が1つの効率的な資産選択基準を提供する(佐藤, 1980)。この基準が2母数の効率基準と呼ばれるものである。マルコビッツはポートフォリオ・セレクション理論の分野にこの基準を導入して多くの優れた業績を残したが、彼の分析理論は、投資家の期待効用最大化の目的を達成するために、確率分布の収益性を期待値で、危険性を分散を指標として捉え、これらの指標のトレード・オフを測る投資家の選好関数によって最も効率的な組み合わせを選択するというものである。ここで数量化されたリスクの概念として分散の概念を使用したものがE V基準である。E V基準は、確率分布の収益性を期待値(E)で捉え、リスクを分散(V)で捉えて、これら2つの指標のトレード・オフの関係について評価する投資家の選好関数に照らして、最も効率的な資産の組み合わせを選択するものである。具体的には図-2に示すように、Eを縦軸、Vを横軸に取った図表上において有効フロンティアの軌跡を描き、投資家の選好関数の形に照らして有効フロンティア上から最適な組み合わせを選択しようとするものである(Markowitz 1981, 久保田, 1989)。

図-2 有効フロンティア

森林計画に即して考えれば、有効フロンティアとその与件変化を森林の所有者に提示し、どの点を選択するのが最適であるかに関しては所有者の主観的判断に委ねる、つまり問い合わせに対する回答に委ねるという考え方である。この方法は単に有効フロンティアを計測し提示するだけで良く、計画モデルとしては簡易であるが、計画論として自己完結しているとは言えない。自己完結させるためには、有効フロンティア上の唯一の最良点を選択するために森林の所有者に関する選好関数を導入する必要がある。

一般的に導入される選好関数の形状や可測性等に関してなお多くの議論があり、この選好関数を具体的に計測することは極めて困難であるが、一定の選好関数を想定して計画モデルの中に具体的に組み込むならば、最高の期待効用水準を見い出せるという点で最適な計画が作成できる。選好関数を陽表的に資産の最適組み合わせの決定に関与させれば、計画モデルとしては自己完結していると言える。

なお計画論の立場からすれば、森林の所有者は、経営純収益から得られる効用と経営純収益の安定性から得られる効用の2つの要素で構成される1種の経営純収益・安定選好関数を持っていて、この効用の数学的期待値を最大化することが森林所有者の究極的な目標であると考えられる。しかし、森林に関する計画の場合、計画期間が超長期および収穫物に関する価格水準を事前に確実に予測することが困難であり、将来における純収益の把握に困難が伴う。また時間生産の典型である森林においてはキャッシュ・フロー間に数十年というタイム・ラグがあるため、将来のキャッシュ・フローに由来する純収益を現在価値に割引くという操作

が必要となるが、割引計算に使用する割引率の決定に客観的基準がなく恣意性が入るなど疑問点も結構多い。

そこで本稿では、森林管理に関する計画目的の測度として伝統的に採用されてきた収穫材積を考慮し、最終目標（上位目標）として経営純収益・安定選好を、最終目標を達成するための副次目標（下位目標）として収穫材積・安定選好を設定する。経営純収益は材価を媒介とし収穫材積と平行の関係にあると考えられ、この下位目標の設定は上位目標と必ずしも矛盾するものではないと言える。なおポートフォリオ理論では、主として単一期間における投資収益の測定問題が主要な課題として取り扱われてきたが、本稿では林分という実物資産を対象とし、かつ多期間にまたがる資産の最適選択を取り上げる点で計画論として意義あるものと言える。

VIII 選好関数の検討と計画モデル

上記の選好関数として相応しい性質を持つものとして式(12)に示す評価関数を考える。

$$U(z) = 1 - e^{-az} \quad a \geq 0 \quad (12)$$

z は収穫材積、 a は強気・弱気の程度を示す危険回避係数である。図-3は危険回避係数 a の値を変化させた場合の評価関数の形状の変化について検討したものである。この図から明らかなように、 a の値を問わず

図-3 評価関数の形状

収穫材積 z が増加すると効用水準は 1 に近づく。危険回避係数 $a = 0.1$ の場合は収穫材積が増加しても効用の増加は極めて小さく、収穫材積の増加をあまり望まずに収穫材積の安定性を望む形状となる。一方、危険回避係数 $a = 0.001$ の場合は収穫材積 z の増加にほぼ比例して効用も増加し、収穫材積の増加を望むが収穫材積の安定性を殆ど望まない形状となる。ここに示した指数型の評価関数では、危険回避係数 a の値が大きくなるほど安全選好型（ローリスク・ローリターン型）の行動を取り、 a の値が小さくなるほど危険選好型（ハイリスク・ハイリターン型）の行動を取るようになる（南石, 1995）。

この評価関数による効用の数学的期待値は $E(U)$ は、収穫材積 z が正規分布に従うと仮定されるときは、

$$E(U) = \int_{-\infty}^{\infty} U(z) P_r(z) dz \\ = \int_{-\infty}^{\infty} (1 - e^{-az}) \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z - \hat{z})^2}{2\sigma_z^2}} dz \quad (13)$$

となり、さらに式(13)から若干の演算を経て式(14)が導ける。

$$E(U) = 1 - e^{-a(\frac{\sigma_z^2}{2} - \hat{z})} \quad (14)$$

危険回避係数 $a = 0.01$ とした場合のこの選好関数による効用の期待値の立体構造を示したものが図-4である。収穫材積が増加すれば効用水準は高まるが、収穫材積の分散が大きくなると効用水準が低くなる構造が容易に確認できる。また、この選好関数の性格から等効用線が直線になるという特徴がある。等効用線の傾

図-4 評価関数の立体モデル

斜が常に一定となるという特徴もこの図から容易に確認できる。

上に示した効用の数学的期待値 $E(U)$ を最大化することは、式(14)の e の指数部分を最小化すれば良く、

$$E(U)^* = \hat{z} - \frac{a}{2} \sigma_z^2 \quad (15)$$

式(15)を最大化することに等しい。さらに σ_{jk} を技術係数 C_j と C_k の共分散 ($\sigma_{jj} = \sigma_{j^2}$) とすれば、

$$E(U)^* = \sum_{j=1}^n \hat{C}_j x_j - \frac{a}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sigma_{jk} x_j x_k \quad (16)$$

となる。ただし、 X_j は j 番目の変数、 X_k は k 番目の変数、 C_j は j 番目の変数に対する技術係数を示す。

以上を整理して、本稿で採用するモデルの定式化をすると次のようになる。収穫材積については通常の線形計画モデルを適用するものとして、

$$\sum_{j=1}^n c_{ij} x_j \leq b_i \quad (i=1, 2, \dots, m) \\ x_j \geq 0 \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

$$E(U)^* = \sum_{j=1}^n \hat{C}_j x_j - \frac{a}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sigma_{jk} x_j x_k \quad (18)$$

式(17)に示す制約条件のもとで、式(18)を最大化する X_j を求めることになり、いわゆる 2 次計画問題となる。

IX 計画対象モデル林分と収穫材積・分散の推定

森林は大面積に展開しているため森林を小区画に分割することが森林計画の基本となる。この問題は決定変数の選択以上に重要なものである。計画対象となる土地の区分については、管理者が計画問題に応えるために森林をどの程度にまで細分化する必要があるのか、当該林分からの収穫を見積もるために計画対象の森林をどのように細分する必要があるかに懸かっていると言える。米国国有林の森林計画システムでは、ストレイタ(strata)という概念が導入されていて、森林計画の策定に有効に利用されている。ストレイタは土地のもつカテゴリーという意味で、計画対象として一纏めにできる単位であって、樹種、林相、施業方法、収穫等が 1 つに括れるものを意味する。幾つかの収穫はストレイタ毎に定義されることになる (Johnson, Stuart and Crim, 1986)。

概ね林相が一様であって森林の取り扱いの単位となる樹木の集団ならびにその樹木が生立している林地を林分というが、林分は森林管理の基礎単位として格好のものであり、米国国有林の森林計画におけるストレ

イタと同様のものとして取り扱える。本稿では、多期間にわたる各林分の保有期間の最適化問題を考えるが、本稿でモデルの検証に使用するモデル林分は表－3に示したとおりである。これはあくまで本稿で提案する計画手法の有効性を検証するためのものであるが、近畿中国森林管理局兵庫森林管理署における林分の一部を取り出したものである。モデル林分について、林齢別の収穫材積量とその分散に関するデータを準備する必要があるが、これらのデータを収集することは困難であるため、本稿では各林分について便宜的に地位や施業法が同じであると見なした。収穫材積とその分散の推定は以下のように行った。

図－5は兵庫森林管理署における平成11～15年の4年間のスギ林の収穫データの実際の状態を示したものであり、表－1はその結果を整理したものである。地

図－5 林齢別収穫材積の分布

位は概ね上で通常の施業方法での管理によるスギ林である。この図に示したデータより林齢別の収穫材積の平均とその分散を計算し図示したものが図－6である。収穫材積の平均も分散も多少凹凸は見られるが、概ね林齢が大きくなるに従って増加する傾向を示している。

本稿では、林齢別の収穫材積とその分散の実際値について3次の回帰式によって平滑化した。その結果は表－2、図－7、8に示したとおりである。回帰式の当てはまりについては、平均値の場合は自由度調整済重相関係数=0.9336、分散の場合は自由度調整済重相関係数=0.9141となり極めて良好であった。

なお、分散の大きさが標本の面積に依存することについて考慮しなければならず、データの由来した現場の規模や状況を詳細に把握する必要がある。本稿では兵庫森林管理署から得た林齢別の収穫材積をha当たり

図－6 林齢別収穫材積の平均・分散

表－1 林齢別材積と分散

林 齢 (年)	標本数	平均材積 (m³/ha)	最大材積 (m³/ha)	最小材積 (m³/ha)	分 散	標準偏差 (m³/ha)	C. V. (%)
36-40	5	172.86	215.30	123.00	1,504.55	38.79	22.44
41-45	11	188.00	233.80	115.00	1,945.18	44.10	23.46
46-50	21	235.69	316.83	106.70	3,340.59	57.80	24.52
51-55	12	234.46	371.43	166.51	3,097.35	55.65	23.74
56-60	14	285.78	385.13	156.70	3,325.04	57.66	20.18
61-65	8	299.62	386.00	189.60	3,160.64	56.22	18.76
66-70	16	303.59	394.33	195.18	4,589.67	67.75	22.32
71-75	18	302.00	485.36	210.83	5,358.58	73.20	24.24
76-80	17	321.05	470.61	211.90	4,939.32	70.28	21.89
81-85	17	338.73	506.00	205.90	6,067.92	77.90	23.00
86-90	16	419.59	554.00	295.00	6,702.54	81.87	19.51

表－２ 林齢別収穫材積と分散の実測値と平滑値

林 齢 (年)	実測値		平滑値	
	平均材積 (m^3/ha)	分 散	平均材積 (m^3/ha)	分 散
35-40	172.86	1,504.55	159.65	1,569.92
41-45	188.00	1,945.18	204.00	2,175.30
46-50	235.69	3,340.59	235.15	2,679.74
51-55	234.46	3,097.35	256.38	3,113.90
56-60	285.78	3,325.04	270.97	3,508.46
61-65	299.62	3,160.64	282.21	3,894.10
66-70	303.59	4,589.67	293.38	4,301.49
71-75	302.00	5,358.58	307.77	4,761.31
76-80	321.05	4,939.32	328.65	5,304.22
81-85	338.73	6,067.92	359.30	5,960.90
86-90	419.59	6,702.54	403.02	6,762.02

表－３ 計画対象モデル林分

モデル林分群	林齢(年)	面積(ha)
1	10-15	18
2	26-30	6
3	41-45	15
4	51-55	10
		計 49

図－７ 林齢別収穫材積と平滑値

図－８ 林齢別収穫材積の分散と平滑値

に単純に換算し、これを基に分布図を描いて林齢別収穫材積の分散を単純に計算したものである。この点については今後検討を要する課題となるが、本稿は計画手法の検討を主要な課題としているので、分散に関する計算は極めて便宜的なものとなっている。

X 2次計画法による最適解の決定

以上により最適計画作成のためのモデル、データの準備が総て整ったことになる。表－3に示したモデル林分を対象とし図－1に示したネットワークにおける各フローの最適決定を2次計画法によって行った。計算には非線形計画ソフトウェアLINGO 9.0 (Release 23 May 2005 : LINDO Systems Inc., N. Dayton St. Chicago, Illinois 60622)を使用した。データ入力の形式は線形計画法の場合と同様であるが、制約式は4グループに区分される。面積バランス式23本、収穫面積の上下限を制約する式9本、収穫材積の計算式1本および収穫材積の分散を計算する式1本となり、制約式は合計で34本となる。変数はダミー変数を含めて合計38個となる。なおLINGO 9.0の場合、基本的には制約式 ≤ 150 、変数 ≤ 300 の2次計画問題を解くことができる。

本稿では、収穫面積を規整するものとして下記の2つを設定した。1)計画期末に形成される1～6齢級の各林分 ≥ 4 haとした。これは一定面積以上の若齢林を計画期末に確保するための制約である。2)計画期末に残存する既存林分に関して、45年生林分 ≥ 8 ha、60年生林分 ≥ 3 ha、75年生林分 ≥ 7 haとした。この制約は蓄積の大きい林分を計画期末まで残存させ一定量以上の森林資源を確保するための制約である。林分の保続を考えるうえで重要な制約となる。これに関する制約条件式は以下のようになる。

$$Z1 + U1 \geq 4$$

$$Z3 + U3 \geq 4$$

$$Y2 + Z5 + U5 \geq 4$$

$$Y4 + Z7 + U7 \geq 4$$

$$Y6 + Z9 + U8 \geq 4$$

$$X2 + Y8 + Z11 \geq 4$$

$$X3 \geq 8$$

$$Y9 \geq 3$$

$$Z12 \geq 7$$

最適解は制約式34本、変数38個の2次計画問題を解くことによって得られる。危険回避係数 a の値を逐次変更し、プラン1～10に関する最適解を表－4に示す。最適解に達するまでのイテレーション数は a の値によって変化するが、プラン1～10に関するイテレーション数は47回～104回の範囲にあり平均72回となった。最適

図－9 危険回避係数と総収穫材積・分散

解において各変数のとる値が各アークに対応する最適フロー値であり、これが当該林分に関する最適管理計画となる。既述のとおり本稿で使用した指数型の評価関数では、行動様式を示す危険回避係数 a の値が大きくなるほど安全選好型（ローリスク・ローリターン型）の行動を取り、 a の値が小さくなるほど危険選好型（ハイリスク・ハイリターン型）の行動を取るようになるが、この結果が図－9によって確認できる。 a の値が大きくなるとグラフ上で左下に移動し総収穫材積も小さいが分散も小さい安全選好型計画となる。一方、 a の値が小さくなりグラフ上で右上に移動すると総収穫材積は大きい分散も大きい危険選好型計画となることが確認できる。

XI 最適計画の評価と検討

危険回避係数 a の値が0.0005以下にまで小さくなると、表－4に示した $X1 \sim U8$ の値は、分散を全く考慮しない線形計画による最適解と完全に一致することになる。線形計画の場合は制約条件下で総収穫材積を最高レベルに引き上げる力が働き、この場合は競合関係にあるプロセス間において有効な制約要素をより少なく消費するプロセスを選択しようとする分化力が作用する。これと同時に有効な制約要素に関する補完的な関係を生かして各プロセスを組み合わせ、経営全体としての総収穫材積を高めようとする統合力が作用することになる。

これに対してE V基準による場合は、総収穫材積最大化目標と同時に収穫材積安定化目標が加わり、この

表-4 最適解の結果

	plan									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a	0.1	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.005	0.0025	0.001	0.0005
総材積 (m ³)	5,531.63	5,599.92	5,690.99	5,926.57	6,236.80	7,034.83	7,052.68	7,088.01	7,135.90	7,138.08
分散	132,062.5	133,721.2	136,843.7	149,351.5	174,767.8	293,049.7	298,405.6	319,568.3	374,674.8	379,417.4
X1	18.0000	18.0000	18.0000	18.0000	18.0000	18.0000	18.0000	18.0000	18.0000	18.0000
X2 *	3.0000	3.0000	3.0000	3.3897	5.0847	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000
X3	15.0000	15.0000	15.0000	14.6102	12.9154	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000
Y1	6.0000	6.0000	6.0000	6.0000	6.0000	6.0000	6.0000	6.0000	6.0000	6.0000
Y2 *	0.9956	1.0392	1.0975	1.3694	1.3552	1.2058	0.9508	0.4048	0.	0.
Y3	5.0044	4.9608	4.9025	4.6306	4.6447	4.7942	5.0492	5.5952	6.0000	6.0000
Y4 *	0.6907	0.5964	0.4707	0.2866	0.1945	0.0582	0.0582	0.	0.	0.
Y5	4.3137	4.3643	4.4318	4.3440	4.4503	4.6664	4.9909	5.5952	6.0000	6.0000
Y6 *	0.8004	0.7366	0.6514	0.6002	0.5963	0.6664	0.9909	1.5952	2.0000	2.0000
Y7	3.5133	3.6278	3.7804	3.7438	3.8540	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000
Y8 *	0.5133	0.6278	0.7804	0.7438	0.8540	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Y9	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000
Z1 *	1.8085	1.8473	1.8989	2.0696	1.9884	1.8616	1.6004	1.0843	0.	0.
Z2	13.1915	13.1528	13.1011	12.9304	13.0116	13.1384	13.3996	13.9157	15.0000	15.0000
Z3 *	1.8276	1.8722	1.9316	2.0675	2.0883	2.1138	2.1582	2.2522	2.1630	2.0000
Z4	11.3639	11.2806	11.1695	10.8629	10.9230	11.0245	11.2415	11.6634	12.8370	13.0000
Z5 *	0.9291	0.7935	0.6128	0.1027	0.	0.	0.	0.	0.	0.0000
Z6	10.4348	10.4871	10.5567	10.7602	10.9232	11.0245	11.2415	11.6634	12.8370	13.0000
Z7 *	1.4910	1.5856	1.7118	1.9346	2.0396	2.1824	2.4275	2.8775	3.8370	4.0000
Z8	8.9438	8.9015	8.8450	8.8256	8.8836	8.8422	8.8139	8.7859	9.0000	9.0000
Z9 *	1.4572	1.5292	1.6253	1.8256	1.8836	1.8422	1.8139	1.7859	2.0000	2.0000
Z10	7.4867	7.3722	7.2196	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000
Z11 *	0.4867	0.3722	0.2196	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Z12	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000
U1 *	2.1915	2.1528	2.1011	2.0440	2.0116	2.1384	2.3996	2.9157	4.0000	4.0000
U2	7.8085	7.8473	7.8989	7.9560	7.9883	7.8616	7.6004	7.0843	6.0000	6.0000
U3 *	2.1724	2.1278	2.0684	1.9528	1.9116	1.8862	1.8418	1.7478	1.8370	2.0000
U4	5.6361	5.7194	5.8305	6.0032	6.0768	5.9754	5.7586	5.3366	4.1630	4.0000
U5 *	2.0753	2.1672	2.2898	2.5279	2.6448	2.7942	3.0492	3.5952	4.0000	4.0000
U6	3.5607	3.5522	3.5407	3.4754	3.4319	3.1812	2.7094	1.7414	0.1630	0.
U7 *	1.8183	1.8180	1.8175	1.7788	1.7658	1.6898	1.5143	1.1224	0.1630	0.
U8 *	1.7424	1.7342	1.7232	1.6966	1.6661	1.4914	1.1951	0.6189	0.1630	0.

注) X1~U8 : 単位 ha, * 印は伐採プロセスに対応。

表一 5 危険回避係数と林分保続表

危険回 避係数 a	林 齢	分 期						
		0	1	2	3	4	5	6
0.1	71-75	-	-	-	-	-	-	7.000
	66-70	-	-	-	-	-	7.487	-
	61-65	-	-	-	-	8.944	-	-
	56-60	-	-	-	10.435	-	-	-
	51-55	-	-	11.364	-	-	-	-
	46-50	-	13.192	-	-	-	-	-
	41-45	15.000	-	-	-	-	-	-
	36-40	-	-	-	-	-	-	-
	31-35	-	-	-	-	-	-	-
	26-30	-	-	-	-	-	-	1.809
	21-25	-	-	-	-	-	1.809	1.828
	16-20	-	-	-	-	1.809	1.828	0.929
	11-15	-	-	-	1.809	1.828	0.929	1.491
	6-10	-	-	1.809	1.828	0.929	1.491	1.457
	1- 5	-	1.809	1.828	0.929	1.491	1.457	0.487
0.01	71-75	-	-	-	-	-	-	7.000
	66-70	-	-	-	-	-	7.000	-
	61-65	-	-	-	-	8.842	-	-
	56-60	-	-	-	11.025	-	-	-
	51-55	-	-	11.025	-	-	-	-
	46-50	-	13.138	-	-	-	-	-
	41-45	15.000	-	-	-	-	-	-
	36-40	-	-	-	-	-	-	-
	31-35	-	-	-	-	-	-	-
	26-30	-	-	-	-	-	-	1.862
	21-25	-	-	-	-	-	1.862	2.114
	16-20	-	-	-	-	1.862	2.114	-
	11-15	-	-	-	1.862	2.114	-	2.182
	6-10	-	-	1.862	2.114	-	2.182	1.842
	1- 5	-	1.862	2.114	-	2.182	1.842	-
0.0005	71-75	-	-	-	-	-	-	7.000
	66-70	-	-	-	-	-	7.000	-
	61-65	-	-	-	-	7.000	-	-
	56-60	-	-	-	9.000	-	-	-
	51-55	-	-	13.000	-	-	-	-
	46-50	-	13.000	-	-	-	-	-
	41-45	15.000	-	-	-	-	-	-
	36-40	-	-	-	-	-	-	-
	31-35	-	-	-	-	-	-	-
	26-30	-	-	-	-	-	-	2.000
	21-25	-	-	-	-	-	2.000	-
	16-20	-	-	-	-	2.000	-	4.000
	11-15	-	-	-	2.000	-	4.000	2.000
	6-10	-	-	2.000	-	4.000	2.000	-
	1- 5	-	2.000	-	4.000	2.000	-	-

2 元的目標は効用目標によって統一されており、総収穫材積の安定を選好する程度はこの評価関数によって決められることになる。危険に対する主観的割引が大きくなるほど、つまり危険回避係数 a が大きくなるほど、総収穫材積が小さくなるとしても、収穫材積の変動幅をより小さくするようなプロセスが選択されることになる。E V 基準においては、総収穫材積選好目標に対する分化力と統合力のみでなく、安定選好目標に対する分化力と統合力が同時に作用することになる。

表－5 は、危険回避係数 a が 0.1, 0.01, 0.0005 の 3 つの場合について 6 分期間にわたる林分保続を整理したものである。 a の値が大きい安全選好型計画では、小規模収穫の繰り返しによって危険回避を図る経営行動を取ることが確認できる。一方、 a の値が小さい危険選好型計画では、危険を冒しても一時の大規模収穫を得ることによって最大の総収穫材積の獲得を図るという経営行動を取ることが確認できる。既述のとおり線形計画法を使用した場合は $a = 0$ となる危険選好型計画となるため、ポートフォリオの観点からは疑問が残ることになる。

森林経営の保続という観点からは、計画期末に成立する林分の林齢と面積は、系列的多段決定過程の終端条件として次のステージの計画を策定する場合の与件を形成するので、ゴーイング・コンサーンとしての森林経営を考える場合には計画期末に成立する林分の林齢と面積は特に重要な意義を持つことになる。E V 基準を採用したことと、系列的多段決定過程の終端条件としての期末林分を具体的に指示することによって、収穫材積の最大化と安定化さらには森林経営の保続性の統一的な取り扱いが可能となる。

XII おわりに

超長期に及ぶ森林管理においては、計画の前提となるデータはあくまで期待値であり、不確実性の支配下に置かれている。データの持つ不確実性は現在の計算時点より未来へ遠ざかるほど増大するが、実際には計算時点で全計画期間にわたるデータを推定せざるを得ない。不確実性下では、時間経過に伴って不確実性が解消されるまで、特定の意思決定の結果は明らかにはならない。このような場合には計画作成の前提条件となる諸数値について当初から確定値を与えず、数値自身を変数と見なし与件変化による最適計画の動きを事前に十分チェックし、諸々の試行実験を繰り返してその後最終的な意思決定を行うことが重要となる。

本稿では、E V 基準を適用した森林経営に関する計画モデルの有効性を検討したが、このモデルによって、森林管理に関する計画における意思決定をオペレーシ

ナルに行えるとともに、感度分析によるシミュレーションによって動態的な決定が可能となり、経営計画に関するシステム化がより推進できるものと考ええる。本稿で検討した計画モデルには幾つかの問題点がある。これらの問題について若干の検討を加えておきたい。

第 1 に、評価関数における行動パラメータとしての危険回避係数 a を推計することは純粹に主観的な問題であり、如何なる値を選んだとしてもその妥当性を裏付けることは極めて困難である。しかし、間接的にこの困難を避ける方法が考えられる。図－9 は総収穫材積のレベルおよび分散に関する機会曲線と考えることができる。この機会曲線は利用可能な諸資源の利用を通じて獲得できる総収穫材積および分散の組み合わせを示している。経営主体はこの曲線上において最善の組み合わせを示す点を選択すれば良い。このことによって経営主体の行動パラメータ a の値およびそれに対応する最適計画を間接的に選択することになる。

第 2 に E V 基準を適用した計画モデルの場合、各林齢別の収穫材積や収益の分散が強く影響を与えるということである。リスクの指標として分散を考慮したときの計画モデルでは、総収穫材積の最大化とともに収穫材積の安定化も経営目標に含まれるため、大きい分散を持つ林齢ではなるべく伐採が避けられ、全体としてリスクを回避する力が作用する。現在の時点より未来へ遠ざかるほど分散が増大しリスクが増大するのが一般的だと考えられるが、本稿での検討では、高林齢になっても分散がさほど大きくならないという結果となった。高齢に達するまでの間伐段階で成長不良木が伐採された結果このような値が得られたものと考えられるが、分散に対する確実なデータの収集と分析が必要である。

以上でポートフォリオに依拠し E V 基準を導入した森林管理の計画に対する検討を終える。実際の森林計画に本格的に適用するときは多くの変数と制約式を持つことになるが、ここで示された基本的方法是変わらない。また分散の推定に限らず多くの基礎的データの信頼性が乏しいという問題が常につきまとうが、このようなデータの不備は決して計画法の否定につながるのではなく、さらなる感度分析やパラメトリック分析を通じて与件の変化が最適解に及ぼす影響を分析することによって様々な試行実験を繰り返し、最終的な意思決定に対する有用な情報が提供できることになる。

森林経営は超長期におよぶ生産活動であるとともに、森林資源の回復性の鈍さ、また公益的機能への期待などから森林の保続の必要性が強調されている。この保続性と収益性、さらに収益の安定性の統一的把握は森林経営にとって極めて重要である。本論ではこのような点に視点を置き、これらを統一的に把握するという

立場から2次計画法を用いた森林管理について計画論的な検討を行った。今後、森林管理の実態に即してこの方法をより完全なものにするとともに、実践性を高めていきたい。

引用文献

- (1) Boungiorno, J., Gilles, K. (2003) Decision Making for Forest Management. 439pp, Academic Press, New York.
- (2) Davis, S., Johnson, N. (1987) Forest Management (Third Edition). 790pp, McGraw-Hill Book Company, New York.
- (3) Johnson, K. N., Stuart, T.W., Crim, S. A. (1986) FORPLAN Version 2 : An Overview USDA. 163pp, Forest Service, Washington. D. C.
- (4) 久保田敬一 (1989) ポートフォリオ理論. 216pp, 日本経済評論社, 東京.
- (5) 栗村哲象 (1970) 林業経営計算学. 393pp, 養賢堂, 東京.
- (6) 黒川泰亨 (1988) 多段階線形計画法による育林投資の最適化. システム農学, 4(1), 74~86.
- (7) Markowitz, H. M., Portfolio Selection-Effective Diversification of Investments, 鈴木雪夫監訳 (1981) ポートフォリオ選択論-効率的な分散投資法-. 432pp, 東洋経済新報社, 東京.
- (8) 南石晃明 (1995) 確率的計画法. 現代数学社, 東京.
- (9) 林野庁監査課 (1974) 森林経営における伐採・更新に関するシステムの研究. 193pp, 林野庁, 東京.
- (10) 佐藤義信 (1980) ポートフォリオ分析の理論. 336pp, 中央経済社, 東京.
- (11) 杉田競 (1979) 経営管理総論. 189pp, 有斐閣, 東京.

(2006年4月10日受付)

(2006年9月29日受理)